

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-72837

(P2002-72837A)

(43) 公開日 平成14年3月12日 (2002.3.12)

(51) Int.Cl.⁷

G 0 3 H 1/26

識別記号

F I

G 0 3 H 1/26

データベース* (参考)

2 K 0 0 8

審査請求 未請求 請求項の数26 O L (全 19 頁)

(21) 出願番号 特願2000-265042 (P2000-265042)

(22) 出願日 平成12年9月1日 (2000.9.1)

(71) 出願人 000002897

大日本印刷株式会社

東京都新宿区市谷加賀町一丁目1番1号

(72) 発明者 北村 満

東京都新宿区市谷加賀町一丁目1番1号

大日本印刷株式会社内

(72) 発明者 浜野 智恒

東京都新宿区市谷加賀町一丁目1番1号

大日本印刷株式会社内

(74) 代理人 100091476

弁理士 志村 浩

Fターム(参考) 2K008 CC01 CC03 DD02 DD03 EE01

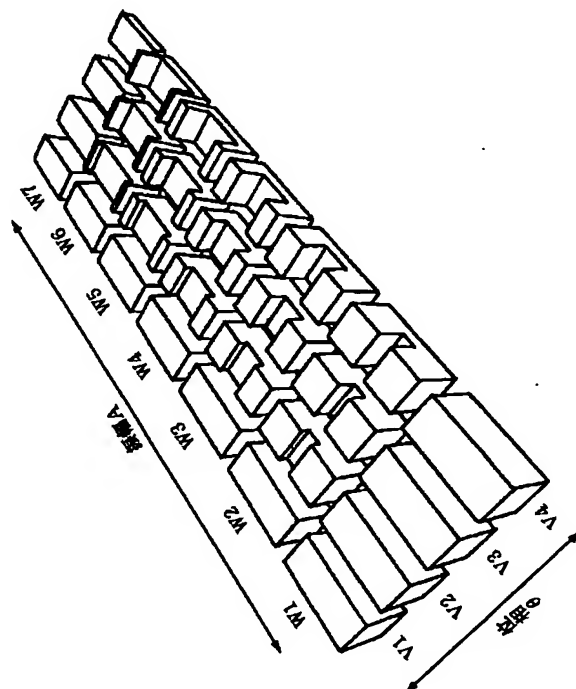
EE04 FF27 HH01

(54) 【発明の名称】 光学素子およびその製造方法

(57) 【要約】

【課題】 再生時に高い回折効率を得ることができ、生産性に優れたホログラムを提供する。

【解決手段】 コンピュータを用いて、任意の物体像と、所定ピッチで代表点が配置された記録面とを定義する。個々の代表点位置において、物体像から発せられた物体光の波面に関する複素振幅を計算し、記録面上に複素振幅分布を求める。この複素振幅分布を、一面に溝をもった三次元セルにより表現する。位相 θ に応じて4通りの溝の深さを定義し、振幅Aに応じて7通りの溝の幅を定義することにより、合計28通りの三次元セルを用意し、個々の代表点位置に、当該代表点についての複素振幅の位相 θ および振幅Aに応じた三次元セルを配置する。記録面上の各代表点位置に、28通りの三次元セルのいずれかを配置することにより、三次元セルの集合体としてホログラム記録媒体を形成する。各セルの溝部の位相/振幅変調機能により、再生像が得られる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 複数の三次元セルの集合からなる光学素子であって、

個々のセルには、それぞれ特定振幅および特定位相が定義されており、

個々のセルに所定の入射光を与えると、当該セルに定義された特定振幅および特定位相に応じて前記入射光の振幅および位相を変化させた射出光が得られるように、個々のセルがそれぞれ特定の光学的特性を有していることを特徴とする光学素子。

【請求項2】 請求項1に記載の光学素子において、個々のセルが、それぞれ特定振幅に応じた透過率をもった振幅変調部を有することを特徴とする光学素子。

【請求項3】 請求項1に記載の光学素子において、個々のセルが、それぞれ特定振幅に応じた反射率をもった振幅変調部を有することを特徴とする光学素子。

【請求項4】 請求項1に記載の光学素子において、個々のセルが、それぞれ特定振幅に応じた有効面積をもった振幅変調部を有することを特徴とする光学素子。

【請求項5】 請求項1～4のいずれかに記載の光学素子において、

個々のセルが、それぞれ特定位相に応じた屈折率をもった位相変調部を有することを特徴とする光学素子。

【請求項6】 請求項1～4のいずれかに記載の光学素子において、

個々のセルが、それぞれ特定位相に応じた光路長をもった位相変調部を有することを特徴とする光学素子。

【請求項7】 請求項1に記載の光学素子において、個々のセルが、それぞれ特定振幅に応じた面積をもった部分を、特定位相に応じた深さだけ掘り下げることにより形成された凹部を有することを特徴とする光学素子。

【請求項8】 請求項1に記載の光学素子において、個々のセルが、それぞれ特定振幅に応じた面積をもった部分を、特定位相に応じた高さだけ隆起させることにより形成された凸部を有することを特徴とする光学素子。

【請求項9】 請求項7または8に記載の光学素子において、

個々のセルの凹部もしくは凸部が形成された面が反射面となっており、セルに与えられた入射光がこの反射面によって反射することにより射出光となることを特徴とする光学素子。

【請求項10】 請求項7または8に記載の光学素子において、

個々のセルが、凹部もしくは凸部を有する本体層と、この本体層の凹部もしくは凸部が形成された面を覆う保護層と、を備え、前記本体層と前記保護層とが互いに異なる材質から構成されていることを特徴とする光学素子。

【請求項11】 請求項10に記載の光学素子において、本体層と保護層とが互いに異なる屈折率をもった透光性

材料から構成されており、セルに与えられた入射光が、前記本体層および前記保護層を通過することにより射出光となることを特徴とする光学素子。

【請求項12】 請求項10に記載の光学素子において、

本体層と保護層との境界が反射面を形成し、セルに与えられた入射光が、前記反射面によって反射することにより射出光となることを特徴とする光学素子。

【請求項13】 請求項1～12のいずれかに記載の光学素子において、

個々のセルが一次元的もしくは二次元的に配列されていることを特徴とする光学素子。

【請求項14】 請求項13に記載の光学素子において、

個々のセルの縦方向のピッチおよび横方向のピッチがそれぞれ等ピッチとなるように配列されていることを特徴とする光学素子。

【請求項15】 請求項1～14のいずれかに記載の光学素子において、

所定の視点位置から観測したときに物体像が再生されるように、当該物体像からの物体光の複素振幅分布が記録されており、ホログラムとして利用することができることを特徴とする光学素子。

【請求項16】 所定の物体像が記録された光学素子を製造する方法であって、

複数の三次元仮想セルの集合を定義するセル定義段階と、

個々の仮想セルについてそれぞれ代表点を定義する代表点定義段階と、

記録すべき物体像を定義する物体像定義段階と、

前記物体像から発せられた物体光の前記各代表点位置における複素振幅を計算することにより、個々の仮想セルに特定振幅および特定位相を定義する振幅位相定義段階と、

個々の仮想セルをそれぞれ実体のある物理セルに置き換え、三次元物理セルの集合からなる光学素子を形成する物理セル形成段階と、

を有し、

前記物理セル形成段階では、個々の物理セルに所定の入射光を与えると、当該物理セルに対応する仮想セルに定義された特定振幅および特定位相に応じて前記入射光の振幅および位相を変化させた射出光が得られるように、それぞれ特定の光学的特性を有する物理セルによって置き換えを行うようにすることを特徴とする光学素子の製造方法。

【請求項17】 請求項16に記載の光学素子の製造方法において、

セル定義段階において、ブロック状の仮想セルを一次元的もしくは二次元的に配列することによりセル集合の定義を行うことを特徴とする光学素子の製造方法。

【請求項18】 請求項16または17に記載の光学素子の製造方法において、
振幅位相定義段階において、物体像上に複数の点光源を定義し、各点光源から所定振幅および所定位相をもった球面波からなる物体光が発せられたものとし、所定の基準時刻において各代表点位置における各点光源からの物体光の合計複素振幅を計算するようにしたことを特徴とする光学素子の製造方法。

【請求項19】 請求項18に記載の光学素子の製造方法において、
物体像上に波長 λ の物体光を発するK個の点光源を定義し、第k番目($k=1\sim K$)の点光源O(k)から発せられる物体光の振幅を A_k 、位相を θ_k とし、所定の代表点Pと第k番目の点光源O(k)との距離を r_k としたときに、前記所定の代表点PにおけるK個の点光源からの物体光の合計複素振幅を、 $\sum (k=1\sim K) (A_k / r_k \cdot \cos(\theta_k \pm 2\pi r_k / \lambda) + i A_k / r_k \cdot \sin(\theta_k \pm 2\pi r_k / \lambda))$ なる計算によって求めることを特徴とする光学素子の製造方法。

【請求項20】 請求項16～19のいずれかに記載の製造方法において、
物理セル形成段階において、個々の仮想セルを、特定振幅に応じた面積をもった部分を、特定位相に応じた深さだけ掘り下げるにより形成される凹部を有する物理セルに置き換えることを特徴とする光学素子の製造方法。

【請求項21】 請求項16～19のいずれかに記載の製造方法において、
物理セル形成段階において、個々の仮想セルを、特定振幅に応じた面積をもった部分を、特定位相に応じた高さだけ隆起させるにより形成される凸部を有する物理セルに置き換えることを特徴とする光学素子の製造方法。

【請求項22】 請求項20または21に記載の製造方法において、
物理セルの凹部に充填された物質もしくは凸部を構成する物質の屈折率を n_1 とし、これに接する別な物質の屈折率を n_2 とし、物体光の波長を λ としたときに、
凹部の最大深さもしくは凸部の最大高さ d_{\max} を、 $d_{\max} = \lambda / |n_1 - n_2|$ に設定し、
特定位相 θ に応じた深さもしくは高さ d を、 $n_1 > n_2$ の場合には、 $d = \lambda \cdot \theta / 2(n_1 - n_2)\pi$ なる計算に基づいて、 $n_1 < n_2$ の場合には、 $d = d_{\max} - \lambda \cdot \theta / 2(n_2 - n_1)\pi$ なる計算に基づいて、それぞれ決定し、
凹部もしくは凸部を透過してくる透過光によって物体像の再生が行われるようにしたことを特徴とする光学素子の製造方法。

【請求項23】 請求項20または21に記載の製造方法において、

物理セルの凹部に充填された物質もしくは凸部を構成する物質の屈折率を n とし、物体光の波長を λ としたときに、

凹部の最大深さもしくは凸部の最大高さ d_{\max} を、 $d_{\max} = \lambda / 2n$ に設定し、

特定位相 θ に応じた深さもしくは高さ d を、 $d = \lambda \cdot \theta / 4n\pi$ なる計算に基づいて決定し、

凹部もしくは凸部の境界面において反射する反射光によって物体像の再生が行われるようにしたことを特徴とする光学素子の製造方法。

【請求項24】 請求項20～23のいずれかに記載の製造方法において、

特定振幅に応じた面積として複数 a 通りの面積を定義し、特定位相に応じた深さもしくは高さとして複数 b 通りの深さもしくは高さを定義し、合計 $a \times b$ 通りの種類の物理セルを用意しておき、個々の仮想セルを、これらの物理セルのうち、必要とされる光学的特性が最も近い物理セルに置き換えることを特徴とする光学素子の製造方法。

【請求項25】 請求項16～24のいずれかに記載の製造方法において、

再生時に照射される照明光の向きもしくは再生時の視点位置を考慮して、各仮想セルについて定義された特定位相に修正を加える位相修正段階を更に有することを特徴とする光学素子の製造方法。

【請求項26】 請求項16～25のいずれかに記載の製造方法において、

セル定義段階において、仮想セルを水平方向および垂直方向に並べるにより、二次元マトリックス上に配列された仮想セルからなるセル集合の定義を行い、
振幅位相定義段階において、物体像上に、それぞれが水平方向に伸び、互いに垂直方向に配置された複数M個の点光源列を定義するとともに、前記二次元マトリックスにおいて垂直方向に隣接する複数行に所属する仮想セル群を1グループとすることにより合計M個のグループを定義し、M個の点光源列とM個のグループとを垂直方向に関する配置順に応じて対応させ、第m番目($m=1\sim M$)の点光源列内の点光源から発せられた物体光が、第m番目のグループに所属する仮想セルにのみ到達するものとして、各代表点位置における合計複素振幅の計算を行うことを特徴とする光学素子の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光学素子およびその製造方法に関し、特に、ホログラムとして立体像を記録し、これを再生することが可能な光学素子およびその製造方法に関する。

【0002】

【従来の技術】立体像を媒体上に記録し、これを再生する方法として、ホログラフィーの技術が古くから知られ

ており、この方法で作成されたホログラムは、観賞用アートや偽造防止用シールなど、様々な分野で利用されている。光学的にホログラムを作成する方法としては、物体から発せられる物体光と参照光との干渉縞を感光性媒体に記録する方法が一般的である。物体光および参照光の光源としては、通常、可干渉性に優れたレーザ光が利用される。一般に、光などの電磁波の挙動は、振幅と位相とをもった波面の伝播として捉えることができ、ホログラムは、このような波面を再生する機能をもった光学素子とすることができる。したがって、ホログラムの記録媒体には、空間のそれぞれの位置における物体光の位相と振幅とを正確に再現するための情報を記録しておく必要がある。感光性媒体上に、物体光と参照光とによって生じる干渉縞を記録すれば、物体光の位相と振幅との双方を含んだ情報を記録することができ、この媒体に参照光と同等の照明再生光を照射することにより、この照明再生光の一部が物体光と等価な波面をもった光として観測できる。

【0003】このように、レーザ光などを用いた光学的な方法でホログラムを作成する場合、物体光の位相と振幅は、参照光との干渉縞としてしか記録することはできない。これは、ホログラムを記録する感光性媒体が、光の強度に応じて感光する特性があるためである。これに対して、最近、コンピュータを用いた演算により、ホログラムを作成する手法も実用化されつつある。この手法は、計算機ホログラム（CGH：Computer Generated Hologram）と呼ばれており、コンピュータを利用して物体光の波面を計算し、その位相と振幅とを何らかの方法で物理的な媒体上に記録することにより、ホログラムの作成が行われる。この計算機ホログラムの手法を用いれば、もちろん、物体光と参照光との干渉縞として像の記録を行うことも可能であるが、参照光を用いずに、物体光の位相と振幅に関する情報を直接記録面に記録することも可能になる。たとえば、記録媒体上に形成した開口部の大きさにより振幅を表し、開口部の位置で位相を表すような記録方式や、媒体を2層の記録層から構成し、一方の記録層に振幅を記録し、もう一方の記録層に位相を記録するような記録方式が提案されている。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】光学的なホログラム作成方法として広く行われている干渉縞として像を記録する方法は、一般に、解像度の高い再生像を得ることができ、光学的な方法で実行することができるために生産性が高いというメリットがあるものの、再生時の干渉縞による回折効率が悪いため、像が暗くなるという問題がある。これに対し、計算機ホログラムの一手法として提案されている物体光の位相と振幅とを媒体上に直接記録する方法は、高い回折効率を得ることができるというメリットがあるものの、位相と振幅とを媒体上に記録することが技術的に困難であり、実用上、生産性が低下すると

いう問題がある。

【0005】そこで本発明は、再生時に高い回折効率を得ることができ、しかも生産性に優れた光学素子を提供することを目的とする。

【0006】

【課題を解決するための手段】(1) 本発明の第1の態様は、複数の三次元セルの集合によって光学素子を構成し、個々のセルには、それぞれ特定振幅および特定位相を定義し、個々のセルに所定の入射光を与えると、当該セルに定義された特定振幅および特定位相に応じて入射光の振幅および位相を変化させた射出光が得られるように、個々のセルがそれぞれ特定の光学的特性を有するようにしたものである。

【0007】(2) 本発明の第2の態様は、上述の第1の態様に係る光学素子において、個々のセルが、それぞれ特定振幅に応じた透過率をもった振幅変調部を有するようにしたものである。

【0008】(3) 本発明の第3の態様は、上述の第1の態様に係る光学素子において、個々のセルが、それぞれ特定振幅に応じた反射率をもった振幅変調部を有するようにしたものである。

【0009】(4) 本発明の第4の態様は、上述の第1の態様に係る光学素子において、個々のセルが、それぞれ特定振幅に応じた有効面積をもった振幅変調部を有するようにしたものである。

【0010】(5) 本発明の第5の態様は、上述の第1～第4の態様に係る光学素子において、個々のセルが、それぞれ特定位相に応じた屈折率をもった位相変調部を有するようにしたものである。

【0011】(6) 本発明の第6の態様は、上述の第1～第4の態様に係る光学素子において、個々のセルが、それぞれ特定位相に応じた光路長をもった位相変調部を有するようにしたものである。

【0012】(7) 本発明の第7の態様は、上述の第1の態様に係る光学素子において、個々のセルが、それぞれ特定振幅に応じた面積をもった部分を、特定位相に応じた深さだけ掘り下げることにより形成された凹部を有するようにしたものである。

【0013】(8) 本発明の第8の態様は、上述の第1の態様に係る光学素子において、個々のセルが、それぞれ特定振幅に応じた面積をもった部分を、特定位相に応じた高さだけ隆起させることにより形成された凸部を有するようにしたものである。

【0014】(9) 本発明の第9の態様は、上述の第7または第8の態様に係る光学素子において、個々のセルの凹部もしくは凸部が形成された面を反射面とし、セルに与えられた入射光がこの反射面によって反射することにより射出光となるようにしたものである。

【0015】(10) 本発明の第10の態様は、上述の第7または第8の態様に係る光学素子において、個々の

セルが、凹部もしくは凸部を有する本体層と、この本体層の凹部もしくは凸部が形成された面を覆う保護層と、を備え、本体層と保護層とが互いに異なる材質から構成されるようにしたものである。

【0016】(11) 本発明の第11の態様は、上述の第10の態様に係る光学素子において、本体層と保護層とを互いに異なる屈折率をもった透光性材料から構成し、セルに与えられた入射光が、本体層および保護層を通過することにより射出光となるようにしたものである。

【0017】(12) 本発明の第12の態様は、上述の第10の態様に係る光学素子において、本体層と保護層との境界を反射面とし、セルに与えられた入射光が、この反射面によって反射することにより射出光となるようにしたものである。

【0018】(13) 本発明の第13の態様は、上述の第1～第12の態様に係る光学素子において、個々のセルを一次元的もしくは二次元的に配列するようにしたものである。

【0019】(14) 本発明の第14の態様は、上述の第13の態様に係る光学素子において、個々のセルの縦方向のピッチおよび横方向のピッチがそれぞれ等ピッチとなるように配列するようにしたものである。

【0020】(15) 本発明の第15の態様は、上述の第1～第14の態様に係る光学素子において、所定の視点位置から観測したときに物体像が再生されるように、当該物体像からの物体光の複素振幅分布を記録するようにし、ホログラムとして利用することができるようにしたものである。

【0021】(16) 本発明の第16の態様は、所定の物体像が記録された光学素子を製造する方法において、複数の三次元仮想セルの集合を定義するセル定義段階と、個々の仮想セルについてそれぞれ代表点を定義する代表点定義段階と、記録すべき物体像を定義する物体像定義段階と、物体像から発せられた物体光の各代表点位置における複素振幅を計算することにより、個々の仮想セルに特定振幅および特定位相を定義する振幅位相定義段階と、個々の仮想セルをそれぞれ実体のある物理セルに置き換え、三次元物理セルの集合からなる光学素子を形成する物理セル形成段階と、を行い、物理セル形成段階では、個々の物理セルに所定の入射光を与えると、当該物理セルに対応する仮想セルに定義された特定振幅および特定位相に応じて入射光の振幅および位相を変化させた射出光が得られるように、それぞれ特定の光学的特性を有する物理セルによって置き換えを行うようにしたものである。

【0022】(17) 本発明の第17の態様は、上述の第16の態様に係る光学素子の製造方法において、セル定義段階において、ブロック状の仮想セルを一次元的もしくは二次元的に配列することによりセル集合の定義を行うようにしたものである。

【0023】(18) 本発明の第18の態様は、上述の第16または第17の態様に係る光学素子の製造方法において、振幅位相定義段階において、物体像上に複数の点光源を定義し、各点光源から所定振幅および所定位相をもった球面波からなる物体光が発せられたものとし、所定の基準時刻において各代表点位置における各点光源からの物体光の合計複素振幅を計算するようにしたものである。

【0024】(19) 本発明の第19の態様は、上述の第18の態様に係る光学素子の製造方法において、物体像上に波長 λ の物体光を発する K 個の点光源を定義し、第 k 番目($k=1\sim K$)の点光源 $O(k)$ から発せられる物体光の振幅を A_k 、位相を θ_k とし、所定の代表点 P と第 k 番目の点光源 $O(k)$ との距離を r_k としたときに、所定の代表点 P における K 個の点光源からの物体光の合計複素振幅を、 $\sum (k=1\sim K) (A_k / r_k \cdot \cos(\theta_k \pm 2\pi r_k / \lambda) + i A_k / r_k \cdot \sin(\theta_k \pm 2\pi r_k / \lambda))$ なる計算によって求めるようにしたものである。

【0025】(20) 本発明の第20の態様は、上述の第16～第19の態様に係る光学素子の製造方法において、物理セル形成段階において、個々の仮想セルを、特定振幅に応じた面積をもった部分を、特定位相に応じた深さだけ掘り下げることにより形成される凹部を有する物理セルに置き換えるようにしたものである。

【0026】(21) 本発明の第21の態様は、上述の第16～第19の態様に係る光学素子の製造方法において、物理セル形成段階において、個々の仮想セルを、特定振幅に応じた面積をもった部分を、特定位相に応じた高さだけ隆起させることにより形成される凸部を有する物理セルに置き換えるようにしたものである。

【0027】(22) 本発明の第22の態様は、上述の第20または第21の態様に係る光学素子の製造方法において、物理セルの凹部に充填された物質もしくは凸部を構成する物質の屈折率を n_1 とし、これに接する別な物質の屈折率を n_2 とし、物体光の波長を λ としたときに、凹部の最大深さもしくは凸部の最大高さ d_{\max} を、 $d_{\max} = \lambda / |n_1 - n_2|$ に設定し、特定位相 θ に応じた深さもしくは高さ d を、 $n_1 > n_2$ の場合には、 $d = \lambda \cdot \theta / 2 (n_1 - n_2) \pi$ なる計算に基づいて、 $n_1 < n_2$ の場合には、 $d = d_{\max} - \lambda \cdot \theta / 2 (n_2 - n_1) \pi$ なる計算に基づいて、それぞれ決定し、凹部もしくは凸部を透過してくる透過光によって物体像の再生が行われるようにしたものである。

【0028】(23) 本発明の第23の態様は、上述の第20または第21の態様に係る光学素子の製造方法において、物理セルの凹部に充填された物質もしくは凸部を構成する物質の屈折率を n とし、物体光の波長を λ としたときに、凹部の最大深さもしくは凸部の最大高さ d_{\max} を、 $d_{\max} = \lambda / 2n$ に設定し、特定位相 θ に応じた

深さもしくは高さ d を、 $d = \lambda \cdot \theta / 4n\pi$ なる計算に基づいて決定し、凹部もしくは凸部の境界面において反射する反射光によって物体像の再生が行われるようにしたものである。

【0029】(24) 本発明の第24の態様は、上述の第20～第23の態様に係る光学素子の製造方法において、特定振幅に応じた面積として複数 a 通りの面積を定義し、特定位相に応じた深さもしくは高さとして複数 b 通りの深さもしくは高さを定義し、合計 $a \times b$ 通りの種類の物理セルを用意しておき、個々の仮想セルを、これらの物理セルのうち、必要とされる光学的特性が最も近い物理セルに置き換えるようにしたものである。

【0030】(25) 本発明の第25の態様は、上述の第16～第24の態様に係る光学素子の製造方法において、再生時に照射される照明光の向きもしくは再生時の視点位置を考慮して、各仮想セルについて定義された特定位相に修正を加える位相修正段階を更に行うようにしたものである。

【0031】(26) 本発明の第26の態様は、上述の第16～第25の態様に係る光学素子の製造方法において、セル定義段階において、仮想セルを水平方向および垂直方向に並べることにより、二次元マトリックス上に配列された仮想セルからなるセル集合の定義を行い、振幅位相定義段階において、物体像上に、それぞれが水平方向に伸び、互いに垂直方向に配置された複数 M 個の点光源列を定義するとともに、二次元マトリックスにおいて垂直方向に隣接する複数行に所属する仮想セル群を1グループとすることにより合計 M 個のグループを定義し、 M 個の点光源列と M 個のグループとを垂直方向に関する配置順に応じて対応させ、第 m 番目($m=1 \sim M$)の点光源列内の点光源から発せられた物体光が、第 m 番目のグループに所属する仮想セルにのみ到達するものとして、各代表点位置における合計複素振幅の計算を行うようにしたものである。

【0032】

【発明の実施の形態】以下、本発明を図示する実施形態に基づいて説明する。

【0033】§1. 本発明の基本原則

図1は、参照光を利用して、光学的に干渉縞として物体像を記録する一般的なホログラフィーの手法を示す斜視図である。物体10の立体像を記録媒体20上に記録する場合、物体10を参照光 R と同一波長の光（通常は、レーザ光）で照らし、物体10からの物体光と参照光 R とによって記録媒体20上に形成される干渉縞を記録することになる。ここでは、記録媒体20上に XY 座標系を定義し、座標 (x, y) に位置する任意の点 $P(x, y)$ に着目すると、この点 $P(x, y)$ には、物体10上の各点 $O(1), O(2), \dots, O(k), \dots, O(K)$ からの各物体光と参照光 R との干渉による合成波の振幅強度が記録されることになる。記録媒体20上の

別な点 $P(x', y')$ にも、同様に、各点からの物体光と参照光 R との干渉による合成波の振幅強度が記録されるが、光の伝播距離が異なるため、点 $P(x, y)$ に記録される振幅強度と点 $P(x', y')$ に記録される振幅強度とは異なる。このようにして、記録媒体20上には、振幅強度分布が記録されることになり、この振幅強度分布によって、物体光の振幅と位相とが表現されていることになる。再生時には、参照光 R と同一波長の再生照明光を参照光 R と同一方向（もしくは、記録媒体20に関して面对称となる方向）から照射することにより、物体10の立体再生像が得られる。

【0034】光学的な方法により、記録媒体20上に干渉縞を記録するには、記録媒体20として感光性材料を用いることになり、干渉縞は記録媒体20上の濃淡パターンとして記録されることになる。一方、計算機ホログラムの手法を利用する場合には、この図1に示す光学系で生じる現象を、コンピュータ上でシミュレーションすればよい。具体的には、現実の物体10や記録媒体20の代わりに、コンピュータ上の仮想三次元空間内において、物体像10および記録面20を定義し、物体像10上に多数の点光源 $O(1), O(2), \dots, O(k), \dots, O(K)$ を定義する。そして、各点光源について、所定の波長、振幅、位相をもった物体光（球面波）を定義し、更に、この物体光と同一波長をもった参照光を定義する。一方、記録面20上に、多数の代表点 $P(x, y)$ を定義し、個々の代表点の位置に到達する物体光と参照光との合成波の振幅強度を演算によって求める。こうして、記録面20上には、演算によって振幅強度分布（干渉縞）が求まることになるので、この振幅強度分布を物理的な記録媒体上に、濃淡分布あるいは凹凸分布として記録すれば、物理的なホログラム記録媒体を作成することができる。

【0035】もっとも、計算機ホログラムの手法を用いれば、必ずしも参照光 R を用いて干渉縞として記録を行う必要はなく、物体像10からの物体光そのものを記録面20に直接記録することも可能である。すなわち、光学的にホログラムを作成する場合には、感光性材料からなる記録媒体20上に、感光に必要な一定時間にわたって干渉波を発生させ、これを干渉縞として記録しなければならない。このため、参照光を利用して定在波となる干渉波を発生させる必要がある。ところが、計算機ホログラムの手法を利用すれば、記録面20上に存在するある瞬間の波の状態を、あたかも時間を静止させて観測することができ、これを記録することができる。別言すれば、所定の基準時刻における記録面20上の各代表点位置における物体光の振幅および位相を演算によって求めることができる。本発明では、このような計算機ホログラムの利点を生かし、物体光を参照光との干渉縞として記録する手法を採らずに、物体光の振幅と位相とを直接記録する手法を採っている。

【0036】いま、たとえば、図2の斜視図に示すように、点光源Oと記録面20とが定義されている場合に、記録面20上の代表点P(x, y)に到達した物体光の振幅と位相がどのように計算されるかを考えてみよう。

一般に、振幅と位相とを考慮した波動は、

$$A \cos \theta + i A \sin \theta$$

なる複素関数で表現される(iは虚数単位)。ここで、Aが振幅を示すパラメータであり、 θ が位相を示すパラメータである。そこで、点光源Oから発せられる物体光を、上記複素関数で定義すれば、代表点P(x, y)の位置における物体光は、

$$A/r \cdot \cos(\theta + 2\pi r/\lambda) + i A/r \cdot \sin(\theta + 2\pi r/\lambda)$$

なる複素関数で表される。ここで、rは、点光源Oと代表点P(x, y)との距離であり、 λ は物体光の波長である。物体光の振幅は距離rが大きくなるにしたがって減衰し、位相は距離rと波長 λ との関係で決定される。この複素関数には、時間を示す変数が入っていないが、これは、前述したように、所定の基準時刻において時間を静止させたときに観測される波の瞬間状態を示す式だからである。

【0037】結局、物体像10の情報を記録面20上に記録するには、図3の斜視図に示されているように、物体像10上に多数の点光源O(1), O(2), ..., O(k), ..., O(K)を定義し、記録面20上の各代表点位置において、各点光源から発せられる物体光の合成波の振幅および位相を演算によって求め、これを何らかの方法で記録すればよい。いま、物体像10上に合計K個の点光源が定義され、第k番目の点光源O(k)から発せられる物体光が、図3に示すように、

$$A_k \cos \theta_k + i A_k \sin \theta_k$$

なる複素関数で表現されたとしよう。物体像10が、それぞれ所定の階調値(濃度値)をもった画素の集合から構成されていたとすれば、振幅を示すパラメータ A_k は、当該点光源O(k)の位置に存在する画素の階調値に対応して定められる。位相 θ_k は、一般的には、 $\theta_k = 0$ なる設定でかまわないが、必要に応じて、物体像10の各部から異なる位相の物体光を発せられているような設定を行うことも可能である。全K個の点光源について、それぞれ上記複素関数で表現される物体光が定義できたら、記録面20上の任意の代表点P(x, y)の位置における全K個の物体光の合成波は、図3に示すように、

$$\sum_{k=1 \sim K} (A_k/r_k \cos(\theta_k + 2\pi r_k/\lambda) + i A_k/r_k \sin(\theta_k + 2\pi r_k/\lambda))$$

なる複素関数で表現されることになる。ここで、 r_k は第k番目の点光源O(k)と代表点P(x, y)との距離である。なお、上述の式は、物体像10を記録媒体の奥に再生させる場合の式に相当する。物体像10を記録

媒体の手前側に浮き出すように再生させる場合には、

$$\sum_{k=1 \sim K} (A_k/r_k \cos(\theta_k - 2\pi r_k/\lambda) + i A_k/r_k \sin(\theta_k - 2\pi r_k/\lambda))$$

なる式により複素関数を計算すればよい(位相の項の符号が負になっている)。したがって、両方の場合を考慮した複素関数は、

$$\sum_{k=1 \sim K} (A_k/r_k \cos(\theta_k \pm 2\pi r_k/\lambda) + i A_k/r_k \sin(\theta_k \pm 2\pi r_k/\lambda))$$

となる。この関数の実数部を R_{xy} 、虚数部を I_{xy} として、 $R_{xy} + i I_{xy}$ なる形にすれば、この合成波の代表点P(x, y)の位置における複素振幅(位相を考慮した振幅)は、図4に示すように、複素座標平面上における座標点Qで示されることになる。結局、代表点P(x, y)における物体光合成波の振幅は、図4に示す座標平面上における原点Oと座標点Qとの距離 $A(x, y)$ で与えられ、位相はベクトルOQと実数軸とのなす角度 $\theta(x, y)$ で与えられることになる。

【0038】かくして、記録面20上に定義された任意の代表点P(x, y)位置における物体光合成波の振幅 $A(x, y)$ と位相 $\theta(x, y)$ とが、計算によって求められることになる。したがって、記録面20上には、物体像10から発せられる物体光の複素振幅分布(物体光合成波の振幅および位相の分布)が得られる。こうして得られた複素振幅分布を、何らかの形で物理的な記録媒体上に記録し、所定の再生照明光を与えたときに、物体光の波面が再生されるようにすれば、物体像10をホログラムとして記録できることになる。

【0039】本願発明者は、記録面20上に物体像10から発せられる物体光の複素振幅分布を記録するために、三次元セルを用いる方法を着想した。三次元セルを用いて複素振幅分布を記録し、物体像10をホログラムとして記録するには、次のような手順を行えばよい。まず、たとえば、図5に示すように、記録面20の位置に、三次元仮想セル集合30を定義する。この三次元仮想セル集合30は、所定寸法をもったブロック状の仮想セルを縦横に並べることにより、セルを二次元的に配列したものである。そして、個々の仮想セルについて、それぞれ代表点を定義する。代表点の位置は、セル内の任意の1点でかまわないが、ここでは、セル前面(物体像10に向かい合った面)の中心点位置に当該セルの代表点を定義することにする。たとえば、三次元仮想セル集合30の前面(物体像10に向かい合った面)にXY座標系を定義し、この座標系における座標(x, y)の位置にある代表点P(x, y)をもつ仮想セルを、仮想セルC(x, y)と呼ぶことにすれば、この仮想セルC(x, y)の前面の中心点に代表点P(x, y)がくることになる。

【0040】一方、物体像10を点光源の集合として定

義する。図5に示す例では、物体像10は、K個の点光源 $O(1)$ 、 $O(2)$ 、 \dots 、 $O(k)$ 、 \dots 、 $O(K)$ の集合として定義されている。これら各点光源からは、それぞれ所定の振幅および位相をもった物体光が発せられ、代表点 $P(x, y)$ には、これら物体光の合成波が到達することになる。この合成波の複素振幅は、前述した式により計算することができ、図4に示す複素座標平面における座標点 Q として示され、この座標点 Q に基づいて、振幅 $A(x, y)$ と位相 $\theta(x, y)$ が得られることは既に述べたとおりである。ここでは、代表点 $P(x, y)$ について得られた振幅 $A(x, y)$ および位相 $\theta(x, y)$ を、当該代表点 $P(x, y)$ を含む仮想セル $C(x, y)$ についての特定振幅 $A(x, y)$ および特定位相 $\theta(x, y)$ と呼ぶことにする。

【0041】以上の手順は、実際にはコンピュータを用いた演算処理として実行されることになる。結局、この演算処理により、三次元仮想セル集合30を構成するすべての仮想セルについて、それぞれ特定振幅と特定位相とを求めることができる。そこで、これら個々の仮想セルをそれぞれ実体のある物理セルに置き換えれば、三次元物理セルの集合からなる光学素子（物体像10が記録されたホログラム記録媒体）が作成できる。ここで、仮想セルに取って代わる物理セルは、仮想セルに定義されている特定振幅および特定位相に応じて、入射光の振幅および位相を変調することができるような光学的特性を有している必要がある。別言すれば、置き換えられた個々の物理セルは、所定の入射光を与えたときに、置換前の仮想セルに定義されていた特定振幅および特定位相に応じて、この入射光の振幅および位相を変化させることにより射出光を生み出す機能をもった特定の光学的特性を有している必要がある。

【0042】このような特定の光学的特性をもった物理セルの集合からなる光学素子に対して、所定の再生用照明光（理想的には、上記演算処理において用いた物体光波長 λ と同じ波長をもった単色光平面波）を照射すれば、個々の物理セルでは、再生用照明光が特定振幅および特定位相によって変調されるので、もとの物体光の波面が再生されることになる。かくして、この光学素子に記録されていたホログラムが再生されることになる。

【0043】§2. 物理セルの具体的な構成

続いて、本発明に用いる物理セルの具体的な構成について述べる。本発明に用いる物理セルは、三次元の立体セルであり、それぞれ特定振幅および特定位相が定義されており、個々のセルに所定の入射光を与えると、当該セルに定義された特定振幅および特定位相に応じて入射光の振幅および位相を変化させた射出光が得られるような特定の光学的特性を有していれば、どのような構成のセルでもかまわない。たとえば、図6に示すような三次元セル $C(x, y)$ について、振幅 $A(x, y)$ および位相 $\theta(x, y)$ が記録されていたとし、このセルに振幅

A_{in} 、位相 θ_{in} なる入射光 L_{in} が与えられた場合には、振幅 $A_{out} = A_{in} \cdot A(x, y)$ 、位相 $\theta_{out} = \theta_{in} \pm \theta(x, y)$ なる射出光 L_{out} が得られるようにすればよい。入射光の振幅 A_{in} は、セルに記録されていた特定振幅 $A(x, y)$ による変調を受けて振幅 A_{out} に変化し、入射光の位相 θ_{in} は、セルに記録されていた特定位相 $\theta(x, y)$ による変調を受けて位相 θ_{out} に変化したことになる。

【0044】三次元セル内において振幅を変調する一つの方法は、セル内に特定振幅に応じた透過率をもった振幅変調部を設けておく方法である（セル全体を振幅変調部として用いてもよいし、セルの一部分に振幅変調部を設けるようにしてもよい）。たとえば、透過率が $Z\%$ の振幅変調部をもったセルは、 $A(x, y) = Z/100$ なる特定振幅が記録されているセルとして機能し、振幅 A_{in} をもった入射光がこのセルを通ると、 $A_{out} = A_{in} \cdot Z/100$ なる振幅をもった射出光に振幅変調されることになる。個々の三次元セルの透過率を任意の値に設定するには、たとえば、着色剤の含有率をそれぞれ変えることにより対応することができる。

【0045】三次元セル内において振幅を変調する別な方法は、セル内に特定振幅に応じた反射率をもった振幅変調部を設けておく方法である。たとえば、反射率が $Z\%$ の振幅変調部をもったセルは、 $A(x, y) = Z/100$ なる特定振幅が記録されているセルとして機能し、振幅 A_{in} をもった入射光がこの振幅変調部で反射して射出したとすれば、 $A_{out} = A_{in} \cdot Z/100$ なる振幅をもった射出光に振幅変調されることになる。個々の三次元セルの反射率を任意の値に設定するには、たとえば、セル内に反射面を用意しておく（この反射面が振幅変調部として機能することになる）、この反射面の反射率を任意の値に設定すればよい。具体的には、たとえば、反射面の表面粗さを変えることにより、反射光と散乱光との割合を調節することができるので、この表面粗さを調節することにより、任意の反射率をもったセルを用意することが可能になる。

【0046】三次元セル内において振幅を変調する更に別な方法は、セル内に特定振幅に応じた有効面積をもった振幅変調部を設けておく方法である。たとえば、入射光の全入射領域の面積を 100% としたときに、このうちの $Z\%$ の有効面積をもった部分に入射した入射光だけから物体像の再生に有効な射出光が得られるような構造からなる振幅変調部をもったセルは、 $A(x, y) = Z/100$ なる特定振幅が記録されているセルとして機能する。すなわち、振幅 A_{in} をもった入射光がこの振幅変調部に入射光しても、そのうちの $Z\%$ の光だけが有効な射出光として出て行くことになるので、 $A_{out} = A_{in} \cdot Z/100$ なる振幅をもった射出光に振幅変調されたことになる。このような特定の有効面積をもった領域部分のみから有効な射出光を得るには、物理的な凹凸構造を

もったセルを用いればよい。その具体例については、§3において説明する。

【0047】一方、三次元セル内において位相を変調する一つの方法は、セル内に特定位相に応じた屈折率をもった位相変調部を設けておく方法である（セル全体を位相変調部として用いてもよいし、セルの一部分に位相変調部を設けるようにしてもよい）。たとえば、屈折率が n_1 の材料からなる位相変調部をもったセルと、屈折率が n_2 の材料からなる位相変調部をもったセルとでは、同一位相をもった入射光を与えても、それぞれ射出光の位相に差が生じることになる。したがって、屈折率の異なる種々の材料からセルを構成するようにすれば、入射光に対して任意の位相変調を施すことが可能になる。

【0048】三次元セル内において位相を変調する別な方法は、セル内に特定位相に応じた光路長をもった位相変調部を設けておく方法である（セル全体を位相変調部として用いてもよいし、セルの一部分に位相変調部を設けるようにしてもよい）。たとえば、屈折率 n をもった同一材料からなる位相変調部をもったセルであっても、この位相変調部の光路長が異なれば、同一位相をもった入射光を与えても、それぞれ射出光の位相に差が生じることになる。たとえば、第1のセルに設けられた位相変調部の光路長が L 、第2のセルに設けられた位相変調部の光路長が $2L$ であったとすると、同一位相をもった入射光が与えられたとしても、第1のセルからの射出光に比べて、第2のセルからの射出光は、屈折率 n をもった材料中を進んだ距離が2倍になるので、それだけ大きな位相差が生じていることになる。任意の光路長をもった位相変調部を実現するには、物理的な凹凸構造をもったセルを用いればよい。その具体例については、§3において説明する。

【0049】このように、特定振幅に基づく振幅変調機能をもった三次元セルや、特定位相に基づく位相変調機能をもった三次元セルは、いくつかの方法によって実現可能であり、上述したいくつかの振幅変調方法および位相変調方法のうちから、任意の方法を選択することにより、本発明に係る光学素子を実現することができる。たとえば、振幅変調方法として、セル内に特定振幅に応じた透過率をもった振幅変調部を設けておく方法を採用、位相変調方法として、セル内に特定位相に応じた屈折率をもった位相変調部を設けておく方法を採用、セル全体を振幅変調部および位相変調部として用いるのであれば、図7の表に示されているような16通りの物理セルを選択的に配列することにより、光学素子を形成することができる。この表の横軸は振幅 A 、縦軸は位相 θ に対応しており、振幅 A および位相 θ ともに、4つのレンジに分けられている。

【0050】ここで、振幅 A が「0～25%」に対応するレンジに描かれたセル（表の第1列目のセル）は、透過率が非常に低い材料からなるセルであり、振幅 A が

「25～50%」に対応するレンジに描かれたセル（表の第2列目のセル）は、透過率がやや低い材料からなるセルであり、振幅 A が「50～75%」に対応するレンジに描かれたセル（表の第3列目のセル）は、透過率がやや高い材料からなるセルであり、振幅 A が「75～100%」に対応するレンジに描かれたセル（表の第4列目のセル）は、透過率が非常に高い材料からなるセルである。一方、位相 θ が「0～ $\pi/2$ 」に対応するレンジに描かれたセル（表の第1行目のセル）は、空気に非常に近い屈折率 n_1 をもつ材料からなるセルであり、位相 θ が「 $\pi/2 \sim \pi$ 」に対応するレンジに描かれたセル（表の第2行目のセル）は、空気よりやや大きい屈折率 n_2 をもつ材料からなるセルであり、位相 θ が「 $\pi \sim 3\pi/2$ 」に対応するレンジに描かれたセル（表の第3行目のセル）は、空気よりかなり大きい屈折率 n_3 をもつ材料からなるセルであり、位相 θ が「 $3\pi/2 \sim 2\pi$ 」に対応するレンジに描かれたセル（表の第4行目のセル）は、空気より非常に大きい屈折率 n_4 をもつ材料からなるセルである。

【0051】このように、図7に示す例では、4通りの透過率、4通りの屈折率をもった合計16個のセルが用意されているが、より高い精度で振幅と位相をセルに記録するには、透過率および屈折率のステップを更に細かく設定し、より多数種類のセルを用意すればよい。このような16通りの物理セルを用いて仮想セルを置き換えるには、個々の仮想セルに定義された特定振幅および特定位相による変調を行うために必要とされる光学的特性に最も近い光学的特性を有する物理セルを選択すればよい。

【0052】§3. 物理セルの実用的な構成

既に述べたように、本発明に用いる物理セルは、特定振幅および特定位相に応じて入射光を変調する機能をもったセルであれば、どのような構成で実現してもかまわない。図7には、特定振幅に応じた変調を透過率により制御し、特定位相に応じた変調を屈折率により制御する例が示されている。このように、理論的には、振幅や位相を変調する方法は、何通りも存在するが、工業的に量産することを考慮すると、必ずしもすべての方法が実用的であるとは言えない。本発明に係る光学素子を用いて、ある程度の解像度をもった物体像を再生するためには、個々の三次元セルの寸法をある程度以下に制限せざるを得ない（大まかに言って、セル寸法が $100\mu\text{m}$ 以上になると、視認性の良い物体像の再生は困難である）。したがって、図7に示す16通りの物理セルを組み合わせる光学素子を作成する場合、微小なセルを部品として二次元的に配列する作業が必要になり、しかも、特定の位置には、16通りのセルのうちの特定のセルを配置する必要がある。このような作業を考えれば、図7に示すような物理セルを用いて光学素子を構成する方法は、工業的な量産には適していないことがわかる。

【0053】本願発明者は、1つの物理セルに振幅と位相の情報をもたせることができ、かつ、そのような物理セルの集合により、工業的量产に適した光学素子を構成する方法として、個々の物理セルに凹凸構造をもたせ、この凹凸構造部分の面積として振幅の情報を記録し、凹凸構造部分の段差長（凹部の深さ、もしくは凸部の高さ）として位相の情報を記録する方法を案出したのである。

【0054】図8は、本発明に利用するのに最適と考えられる物理セルC(x, y)の構造の一例を示す斜視図である。図示のとおり、この三次元物理セルは、ほぼ直方体のブロック状をしており、その上面には、溝G(x, y)が形成されている。この例では、物理セルC(x, y)の寸法は、図において、 $C1=0.6\mu\text{m}$ 、 $C2=0.25\mu\text{m}$ 、 $C3=0.25\mu\text{m}$ であり、溝G(x, y)の寸法は、 $G1=0.2\mu\text{m}$ 、 $G2=0.05\mu\text{m}$ 、 $G3=C3=0.25\mu\text{m}$ である。このような構造をもった物理セルC(x, y)を用いれば、振幅の情報は、溝G(x, y)の横方向の幅G1の値として記録することができ、位相の情報は、溝G(x, y)の深さG2の値として記録することができる。別言すれば、特定振幅および特定位相が定義された仮想セルを、このような構造をもった物理セルで置き換える際には、特定振幅に応じた寸法G1を有し、特定位相に応じた寸法G2を有する物理セルによる置き換えが行われることになる。

【0055】この図8に示す物理セルにおいて、振幅の情報が溝G(x, y)の幅G1として記録され、位相の情報が溝G(x, y)の深さG2として記録される理由を、図9の正面図を参照して説明しよう。いま、この物理セルC(x, y)が屈折率 $n2$ をもった物質から構成されており、この物理セルC(x, y)の外側が屈折率 $n1$ をもった物質（たとえば、空気）から構成されているものとする。このとき、溝G(x, y)の内部の面S1に垂直に入射した光L1と、溝G(x, y)の外部の面S2に垂直に入射した光L2とについて、屈折率 $n2$ の媒質中を通過する光路長を比較すると、光L1の光路長の方が、光L2の光路長よりも、溝G(x, y)の深さG2の分だけ短くなることがわかる。したがって、屈折率 $n1$ 、 $n2$ が異なっていれば、物理セルC(x, y)から透過光として射出される光L1と光L2との間には、所定の位相差が生じることになる。

【0056】一方、図10は、物理セルC(x, y)からの反射光として射出光が得られる場合を示す正面図である。この例では、物理セルC(x, y)の上面、すなわち、面S1およびS2が反射面となっており、溝G(x, y)の内部の面S1にほぼ垂直に入射した光L1と、溝G(x, y)の外部の面S2にほぼ垂直に入射した光L2とが、それぞれ各面にほぼ垂直に反射して射出することになる。このとき、入射および反射の経路に沿

った全光路長を比較すると、光L1の光路長の方が、光L2の光路長よりも、溝G(x, y)の深さG2の2倍に相当する分だけ長くなることがわかる。したがって、物理セルC(x, y)から反射光として射出される光L1と光L2との間には、所定の位相差が生じることになる。

【0057】このように、物理セルC(x, y)が透過型のセルであっても、反射型のセルであっても、溝G(x, y)の内部の面S1に入射した光L1と、溝G(x, y)の外部の面S2に入射した光L2との間には、所定の位相差が生じることになり、この位相差は溝G(x, y)の深さG2に応じて決まることになる。そこで、物理セルC(x, y)の上面に入射した光のうち、溝G(x, y)の内部の面S1への入射光に基づいて得られる射出光のみを、物体像10の再生に有効な射出光として取り扱うことにすれば（別言すれば、図9または図10において、光L1のみを像の再生に有効な射出光として取り扱うようにすれば）、像の再生に有効な射出光L1は、この物理セルC(x, y)において、溝G(x, y)の深さG2に対応した特定位相による位相変調を受けたことになる。かくして、物体光の位相の情報は、溝G(x, y)の深さG2として記録することができる。

【0058】また、上述のように、溝G(x, y)の内部の面S1への入射光に基づいて得られる射出光のみを、物体像10の再生に有効な射出光として取り扱うことにすれば、物体光の振幅の情報を、溝G(x, y)の幅G1として記録することができる。なぜなら、溝G(x, y)の幅G1が大きくなればなるほど、溝G(x, y)の内部の面S1の面積も大きくなり、物体像10の再生に有効な射出光の割合が増えるためである。すなわち、図9または図10に示す射出光L2には、何ら意味のある位相成分が含まれていないため、再生時に視点位置においてこれら射出光L2が観測されたとしても、いわゆるバックグラウンドのノイズ成分として観測されるだけであり、意味のある像を再生する有効な光としては認識されないことになる。これに対し、射出光L1には、意味のある位相成分が含まれているため、像の再生に有効な信号成分として観測されることになる。結局、溝G(x, y)の幅G1は、当該物理セルC(x, y)から射出される光のうちの信号成分として観測される光L1の割合を決定する要素ということになり、信号波の振幅の情報を与えるパラメータになる。

【0059】もっとも、一般的には、振幅の情報は、溝G(x, y)の幅G1によって表現されているわけではなく、溝G(x, y)の内部の面S1の面積によって表現されることになる。図8に示す実施形態の場合は、たまたま、溝G(x, y)の奥行き寸法G3が、物理セルC(x, y)の奥行き寸法C3に常に等しくなるように設定しているため、溝G(x, y)の内部の面S1の面

積が、幅 G_1 の長さに比例することになっているが、溝 $G(x, y)$ の奥行き寸法 G_3 は必ずしも一定にする必要はなく、幅寸法と奥行き寸法との両者を変化させて、溝 $G(x, y)$ の内部の面 S_1 の面積にバリエーションをもたせるようにしてもかまわない。

【0060】このように、ブロック状の物理セルの上面のうち、特定振幅に応じた面積をもった部分（図8の面 S_1 に相当する部分）を、特定位相に応じた深さ（図8の寸法 G_2 に相当する深さ）だけ掘り下げることにより、凹部（溝 $G(x, y)$ ）を形成するようにすれば、このような構造をもった物理セルによって、再生用照明光に対して、特定振幅に応じた振幅変調および特定位相に応じた位相変調を施すことが可能になる。もっとも、ブロック状の物理セルに凹部を形成する代わりに、凸部を形成しても、同様の変調処理が可能である。すなわち、図8に示す物理ブロックにおいて、寸法 G_2 を負の値に設定し、溝の代わりに突起部を形成するようにしても、この突起部の高さに応じた光路差を生じさせることができ、位相差を生じさせることができる。別言すれば、ブロック状の物理セルの上面のうち、特定振幅に応じた面積をもった部分を、特定位相に応じた高さだけ隆起させることにより、凸部を形成するようにすれば、このような構造をもった物理セルによっても、再生用照明光に対して、特定振幅に応じた振幅変調および特定位相に応じた位相変調を施すことが可能になる。

【0061】図8に示すような溝 $G(x, y)$ をもった物理セル $C(x, y)$ では、溝の幅 G_1 および深さ G_2 は連続的に変化させることができるので、理論的には、無限種類の物理セルを用意することが可能である。このような無限種類の物理セルを用いれば、仮想セルに定義された特定振幅に応じた正確な溝幅 G_1 をもち、特定位相に応じた正確な深さ G_2 をもった物理セルによって、当該仮想セルを置き換えることが可能である。しかしながら、実用上は、 a 通りの溝幅、 b 通りの深さを予め定め、合計 $a \times b$ 通りの物理セルを用意しておき、これらの物理セルの中から必要とされる光学的特性が最も近い物理セルを選択するのが好ましい。図11は、7通りの溝幅と、4通りの深さを定め、合計28通りの物理セルを用意した例を示す斜視図である。この28通りの物理セルは、いずれも図8に示す形態をしたブロック状の物理セルであり、図11には、これらの物理セルを4行7列の行列状に配置した状態が示されている。

【0062】この図11に示された行列の7つの列は、振幅 A のバリエーションを示し、4つの行は、位相 θ のバリエーションを示している。たとえば、列 W_1 に位置するセルは、振幅 A の最小値に対応するセルであり、溝幅 $G_1 = 0$ 、すなわち、溝 G が全く形成されていないセルになっている。列 $W_2 \sim W_7$ へと右側へ移動するにしたがって、より大きな振幅 A に対応するセルとなっており、溝幅 G_1 は徐々に広がっている。列 W_7 に位置する

セルは、振幅 A の最大値に対応するセルであり、溝幅 $G_1 = \text{セル幅 } C_1$ 、すなわち、全面が掘られたセルになっている。また、この図11に示された行列の行に着目すると、たとえば、行 V_1 に位置するセルは、位相 θ の最小値に対応するセルであり、溝の深さ $G_2 = 0$ 、すなわち、溝 G が全く形成されていないセルになっている。行 $V_2 \sim V_4$ へと下側へ移動するにしたがって、より大きな位相 θ に対応するセルとなっており、溝の深さ G_2 は徐々に大きくなっている。

【0063】§4. 実用的な物理セルを用いた光学素子の作成方法

ここでは、図11に示すような28通りの物理セルを利用して、物体像10が記録された光学素子（ホログラム記録媒体）を作成する具体的な方法を述べる。まず、コンピュータを利用して、図5に示すように、点光源の集合からなる物体像10と、三次元仮想セル集合30を定義する。ここで、三次元仮想セル集合30を構成する個々の仮想セルは、図8に示すようなブロック状のセル（この時点では、まだ溝は形成されていない）であり、このセルを縦横に等ピッチで二次元配列することにより、三次元仮想セル集合30を形成する。1つの仮想セルの寸法は、たとえば、 $C_1 = 0.6 \mu\text{m}$ 、 $C_2 = 0.25 \mu\text{m}$ 、 $C_3 = 0.25 \mu\text{m}$ 程度とすればよく、この場合、セルの横方向のピッチを、 $0.6 \mu\text{m}$ 、縦方向のピッチを、 $0.25 \mu\text{m}$ とすれば、セルを隙間なく配置することができる。もちろん、ここに紹介した各セルの寸法値は一例であり、実際には、必要に応じて任意の寸法に設定することができる。ただ、セル寸法が大きくなればなるほど、物体の再生像が得られる視野角が狭くなり、物体の解像度も低下することになる。逆に、セル寸法が小さくなればなるほど、物理セルの凹凸構造を形成するための加工が技術的に困難になってくる。なお、セル配置は、必ずしも等ピッチで行う必要はないが、演算処理や物理セルの加工作業の便宜を考慮すると、縦および横にそれぞれ所定の等ピッチでセルを配置するのが好ましい。

【0064】こうして、物体像10および三次元仮想セル集合30の定義が完了したら、各仮想セル内に代表点を定義し、§2で述べたように、各代表点位置に到達した各物体光の合成波の複素振幅を計算し、個々の仮想セルについて特定振幅および特定位相を定義する。続いて、各仮想セルを、図11に示す28通りの物理セルのいずれかに置き換え（個々の仮想セルに定義されている特定振幅および特定位相に応じた変調を行うために必要とされる光学的特性が最も近い物理セルに置き換える）、物理セルの集合としての光学素子を作成する。このとき、各物理セルの溝形成面（図8や図11に示されている物理セルの場合には上面）が、図5に示す三次元仮想セル集合30の前面（物体像10に向かい合った面）側を向くようにする。

【0065】もっとも、実際には、仮想セルを物理セルに置き換える作業は、光学素子となるべき媒体表面に、所定の凹凸構造を形成する処理として行われる。上述したように、図5に示す三次元仮想セル集合30の個々の仮想セルを物理セルに置き換える際には、溝が前面側を向くように物理セルが配置されることになるので、最終的に作成される光学素子は、表面に多数の溝からなる凹凸構造が形成された媒体となる。したがって、仮想セルを物理セルに置き換える作業は、各仮想セルの情報（各仮想セルに定義された特定振幅および特定位相を示す情報）を記憶しているコンピュータから、凹凸パターンに関するデータを描画装置に与え、この描画装置により、物理的な媒体表面に凹凸パターンを描画する処理として行われることになる。微細な凹凸パターンを描画する処理は、たとえば、電子線描画装置などを用いたパターニング技術を利用して行うことができる。また、同一の光学素子を量産する場合には、電子線描画装置などを用いた描画処理により、所望の凹凸構造が形成された原版を作成し、この原版を用いたスタンプ工程により、凹凸構造を多数の媒体上に転写するようにすればよい。

【0066】なお、本発明に係る光学素子は、基本的には、図8に示すような物理セルを二次元的に配列することにより得られる本体層によって構成されるが、必要に応じて、この本体層の表面に保護層を形成するようにしてもよい。この保護層は、本体層の表面に形成された凹凸面を覆う役目を果たす。本体層と保護層とは、互いに異なる材質から構成されるようにする。

【0067】各物理セルに与えられた入射光が、本体層および保護層を通過することにより射出光となるような透過型の光学素子の場合、本体層と保護層とは、互いに異なる屈折率をもった透光性材料で構成しておく必要がある。ここでは、このような本体層と保護層との二層構造からなる透過型の光学素子（透過型の物理セル）を作成する場合の溝Gの深さと位相との具体的な関係を検討してみる。

【0068】いま、図12の上段の断面図に示すような構造をもった透過型セルC(x, y)の場合を考える。このセルは、深さd(x, y)の溝Gが形成されている本体層Caと、その上面に溝Gを埋めるようにして形成された保護層Cbと、の二層構造をもったセルである。ここで、保護層Cbを形成する材料の屈折率（別言すれば、凹部に充填された物質もしくは凸部を構成する物質の屈折率）をn1とし、本体層Caを形成する材料の屈折率をn2とすれば、溝Gの最大深さ（凹部の最大深さもしくは凸部の最大高さ）dmaxを、 $d_{\max} = \lambda / |n_1 - n_2|$ に設定すると、波長λの光に対して、0～2πまでの範囲内の位相変調を施すことができる物理セルが実現できる。たとえば、波長λ=400nmとし、屈折率の差|n1 - n2|=2であったとすれば、dmax=200nm(0.2μm)に設定すればよいことにな

る。

【0069】この場合、特定位相θ(x, y)に応じた深さd(x, y)は、図12に示すように、n1>n2の場合には、

$$d(x, y) = \lambda \cdot \theta(x, y) / 2(n_1 - n_2)\pi$$

なる式により求められ、n1<n2の場合には、

$$d(x, y) = d_{\max} - \lambda \cdot \theta(x, y) / 2(n_2 - n_1)\pi$$

なる式により求まることになる。したがって、ある1つの仮想セルC(x, y)についての特定振幅および特定位相が、それぞれA(x, y)およびθ(x, y)と求まったら、上述の式に特定位相θ(x, y)を代入して、対応する深さd(x, y)を計算によって求め、図11に示す28通りの物理セルの中から、計算によって求めた深さd(x, y)に最も近い深さを有し、特定振幅A(x, y)に応じた寸法に最も近い横幅を有する物理セルを選択し、当該仮想セルC(x, y)を選択した物理セルに置き換える作業を行えばよい。なお、保護層Cbを設けなかった場合には、保護層の屈折率n1として空気の屈折率（ほぼ1）を用いればよい。

【0070】一方、図13の上段の断面図に示すような構造をもった反射型セルC(x, y)の場合を考えてみよう。このセルは、深さd(x, y)の溝Gが形成されている本体層Caと、その上面に溝Gを埋めるようにして形成された保護層Cbと、の二層構造をもったセルであるが、本体層Caと保護層Cbとの境界が反射面となっており、図の上方から下方に向かって保護層Cbに入ってきた入射光は、この反射面で反射して図の上方へ向けて射出することになる。ここで、保護層Cbを形成する材料の屈折率（別言すれば、凹部に充填された物質もしくは凸部を構成する物質の屈折率）をnとすれば、溝Gの最大深さ（凹部の最大深さもしくは凸部の最大高さ）dmaxを、 $d_{\max} = \lambda / 2n$ に設定すると、波長λの光に対して、0～2πまでの範囲内の位相変調を施すことができる物理セルが実現できる。たとえば、波長λ=400nmとし、屈折率n=2であったとすれば、dmax=100nm(0.1μm)に設定すればよいことになる。

【0071】この場合、特定位相θ(x, y)に応じた深さd(x, y)は、図13に示すように、

$$d(x, y) = \lambda \cdot \theta(x, y) / 4n\pi$$

なる式により求まる。保護層Cbを設けなかった場合には、保護層の屈折率nとして空気の屈折率（ほぼ1）を用いればよいので、溝Gの最大深さ：dmax=λ/2と設定し、特定位相θ(x, y)に応じた深さd(x, y)は、

$$d(x, y) = \lambda \cdot \theta(x, y) / 4\pi$$

とすればよい。

【0072】§5. 再生環境の便宜を考慮した変形例
ここでは、これまで述べてきた方法によって作成された

光学素子に再生用照明光を当て、ホログラムとして記録されている物体像10を再生する環境を考えてみる。図14は、このような再生を行う場合の光学素子40（物理セルを用いたホログラム記録媒体）と、再生用照明光LtまたはLrと、視点Eとの関係を示す側面図である。光学素子40が、透過型セルを用いた透過型タイプの場合、図示のとおり、視点Eとは反対側の面に再生用照明光Ltを照射し、光学素子40を透過してきた光を視点Eにおいて観察することになり、光学素子40が、反射型セルを用いた反射型タイプの場合、図示のとおり、視点Eと同じ側の面に再生用照明光Lrを照射し、光学素子40から反射してきた光を視点Eにおいて観察することになる。いずれにせよ、これまで述べてきた方法で光学素子40を作成した場合は、再生用照明光LtまたはLrを単色光の平面波として与え、図14に示されているように、光学素子40の記録面（物理セルが配列されている二次元配列面）の法線方向から再生用照明光LtまたはLrを照射し（別言すれば、波面が光学素子40の記録面に平行になるように再生用照明光を照射し）、記録面の法線方向から像の観察を行うと、最も良好な再生像が得られることになる。

【0073】しかしながら、ホログラムとして物体像10が記録されている光学素子40の実際の再生環境は、必ずしも図14に示すような理想的な環境にはならない。特に、反射型タイプの場合、視点Eの位置には観測者の頭が位置するため、図14に示す方向から再生用照明光Lrを照射しても、光学素子40には観測者の影ができてしまい、良好な再生を行うことができない。したがって、実際の再生環境は、図15に示すように、光学素子40の記録面に対して斜め方向から再生用照明光LtもしくはLrを照射し、法線方向に位置する視点Eにおいて再生像を観察するか、図16に示すように、光学素子40の記録面の法線方向から再生用照明光LtもしくはLrを照射し、斜め方向に位置する視点Eにおいて再生像を観察するか、あるいは、再生用照明光Lt、Lrの照射方向も、視点Eからの観察方向も、いずれも斜め方向に設定する、という形式になるのが一般的である。

【0074】このような実際の再生環境において、良好な再生像が得られるような光学素子40を作成するためには、再生時に照射される照明光の向きおよび再生時の視点位置を考慮して、各仮想セルについて定義された特定位相に修正を加える位相修正処理を行うようにすればよい。

【0075】たとえば、図17に示すように、斜め方向から再生用照明光L1～L4を照射し、光学素子40を透過することにより振幅および位相の変調を受けた光L1～L4（物体像10からの物体光の波面を再現した光）を、法線方向に位置する視点Eにおいて観察する場合を考えてみよう。再生用照明光L1～L4が波長λ

をもった単色平面波であるとし、このような再生用照明光を斜め方向から光学素子40に照射したとすると、光学素子40上の各点P1～P4に到達した時点で、既に光路差が生じており、各点P1～P4における入射光自体が既に位相差を生じていることになる。たとえば、点P2、P3、P4の位置への入射光は、点P1の位置への入射光に比べて、光路長がd2、d3、d4だけ長くなっているため、この光路差の分だけ入射光自体が既に位相差を生じていることになる。そこで、「この図17に示すような再生環境において良好な再生像が得られる光学素子40を作成する」という前提であれば、各仮想セルについて、これまで述べた方法によって特定位相を求めた後に、これら各特定位相をセル位置に応じて修正する処理を行えばよい。たとえば、図17の点P1の位置にあるセルについては修正不要であるが、点P2の位置にあるセルについては、光路差d2によって生じる位相差を相殺することができるように、特定位相に修正を加えることになる。このように、特定位相に対する修正を行って光学素子40を作成すれば、視点Eの方向に射出される光L1～L4によって、良好な再生像が与えられることになる。

【0076】このような特定位相に対する修正処理は、図18に示すように、法線方向から再生用照明光L1～L4を照射し、光学素子40を透過することにより振幅および位相の変調を受けた光L1～L4（物体像10からの物体光の波面を再現した光）を、斜め方向に位置する視点Eにおいて観察する場合についても同様である。すなわち、再生用照明光L1～L4が波長λをもった単色平面波であるとし、このような再生用照明光を法線方向から光学素子40に照射したとすると、光学素子40上の各点P1～P4に到達した時点では、何ら光路差は生じておらず、各点P1～P4における入射光の位相は揃っている。しかしながら、各点P1～P4の位置から発せられる射出光が視点Eに到達するまでの光路長にはそれぞれ差が生じており、視点Eにおいて観察した時点で位相差が生じてしまうことになる。たとえば、点P2、P3、P4の位置からの射出光は、点P1の位置からの射出光に比べて、光路長がd2、d3、d4だけ長くなっているため、この光路差の分だけ視点Eの位置では位相差が生じてしまうことになる。そこで、「この図18に示すような再生環境において良好な再生像が得られる光学素子40を作成する」という前提であれば、各仮想セルについて、これまで述べた方法によって特定位相を求めた後に、これら各特定位相をセル位置に応じて修正する処理を行えばよい。たとえば、図18の点P1の位置にあるセルについては修正不要であるが、点P2の位置にあるセルについては、光路差d2によって生じる位相差を相殺することができるように、特定位相に修正を加えることになる。このように、特定位相に対する修正を行って光学素子40を作成すれば、視点Eの方

向に射出される光 $L_1 \sim L_4$ によって、良好な再生像が与えられることになる。

【0077】以上、特定位相に対する修正処理を、透過型の光学素子40について説明したが、反射型の光学素子40であっても、その修正処理の原理は全く同じである。

【0078】一方、再生用照明光の波長について検討すると、実際の再生環境では、波長 λ の単色光を再生用照明光として利用できるケースは極めて稀であり、通常は、白色に近い再生用照明光のもとで再生が行われるケースが一般的であると考えてよい。このように、複数の波長成分を含んだ再生用照明光を用いて再生を行うと、各波長の光ごとに異なる位相変調が行われることになるので、良好な再生像が得られなくなる。具体的には、種々の色をもった像が少しずつずれて重なったような再生像が観察されることになる。

【0079】そこで、白色の再生用照明光を用いた再生環境でも、ある程度良好な再生像が得られるようにするためには、物体光の複素振幅分布を計算する際に、図19に示すような工夫を行うようにすればよい。この図19に示す系は、図5に示す系と同様に、コンピュータ上で物体像10および三次元仮想セル集合30を定義し、物体像10から発せられる各物体光の合計複素振幅の分布を、三次元仮想セル集合30上に求める演算を行うためのものである。ここで、三次元仮想セル集合30は、仮想セルを水平方向および垂直方向に並べることにより構成され、二次元マトリックス上に配列された仮想セルからなるセル集合である。各仮想セルには、それぞれ代表点が定義されている。

【0080】ここで述べる手法を用いる場合、各代表点位置における合計複素振幅の計算は、次のような方法によって行われる。まず、物体像10上に、それぞれが水平方向に伸び、互いに垂直方向に配置された複数 M 個の点光源列を定義する。図示の例では、 $M=3$ として、3本の点光源列 m_1 、 m_2 、 m_3 が定義されている。各点光源列には、それぞれ水平方向に並んだ複数の点光源が含まれている。たとえば、点光源列 m_1 には、 j 個の点光源 $O(m_1, 1)$ 、 $O(m_1, 2)$ 、 \dots 、 $O(m_1, j)$ が含まれている。一方、三次元仮想セル集合30側においては、二次元マトリックスにおいて垂直方向に隣接する複数行に所属する仮想セル群を1グループとすることにより合計 M 個のグループを定義する。図示の例では、 $M=3$ として、合計3個のグループが定義されている。すなわち、第1のグループ g_1 は、第1行～第3行に所属する仮想セル群からなり、第2のグループ g_2 は、第4行～第6行に所属する仮想セル群からなり、第3のグループ g_3 は、第7行～第9行に所属する仮想セル群からなる。

【0081】このように、物体像10側に M 個の点光源列を定義し、三次元仮想セル集合30側に M 個のグルー

プを定義したら、 M 個の点光源列と M 個のグループとを垂直方向に関する配置順に応じて対応させる。すなわち、図示の例の場合、一番上の点光源列 m_1 を一番上のグループ g_1 に対応させ、中央の点光源列 m_2 を中央のグループ g_2 に対応させ、一番下の点光源列 m_3 を一番下のグループ g_3 に対応させることになる。そして、第 m 番目($m=1 \sim M$)の点光源列内の点光源から発せられた物体光が、第 m 番目のグループに所属する仮想セルにのみ到達するものとして、各代表点位置における合計複素振幅の計算を行うのである。たとえば、図19における点光源列 m_1 に所属する点光源 $O(m_1, 1)$ 、 $O(m_1, 2)$ 、 \dots 、 $O(m_1, j)$ から発せられた物体光は、グループ g_1 に所属する仮想セル(第1行～第3行に配列されている仮想セル)にのみ到達するものとし、グループ g_2 や g_3 に所属する仮想セルには到達しないものとして、合計複素振幅の計算を行うようにする。換言すれば、グループ g_1 に所属する仮想セルの代表点位置における合計複素振幅の計算は、点光源列 m_1 に所属する点光源 $O(m_1, 1)$ 、 $O(m_1, 2)$ 、 \dots 、 $O(m_1, j)$ から発せられた物体光のみを考慮し、点光源列 m_2 、 m_3 に所属する点光源から発せられた物体光は考慮しないことになる。

【0082】実は、このような条件で物体像10の記録を行うと、本来のホログラムとしての記録は行われなくなる。そもそもホログラムの基本原理は、記録面のどの位置にも、物体像10のすべての情報が記録されているようにすることにあり、そのような記録を行うことにより、立体像の再生が行われるのである。上述した条件で物体像10の記録を行うと、グループ g_1 の領域には、点光源列 m_1 の部分(すなわち、物体像10の上部の一部)の情報しか記録されないことになるので、本来のホログラムとしての立体再生像は得られなくなる。具体的には、水平方向に関する立体視は可能になるが、垂直方向に関する立体視が不十分になる。しかしながら、このような条件で物体像10の記録を行うと、白色の再生用照明光を用いた再生環境においては、より良好な再生像(垂直方向に関する立体視は不十分であるものの、より鮮明な再生像)が得られるようになる。これは、垂直方向に関して、物体像10を部分ごとに分けて記録したことにより、再生時の垂直方向に関する再生光の波長分散を抑制する効果が得られるためである。

【0083】以上、本発明を図示するいくつかの実施形態に基づいて説明したが、本発明はこれらの実施形態に限定されるものではなく、この他にも種々の形態で実施可能である。たとえば、上述の実施形態では、個々の三次元セルを、二次元マトリックス状に配列することにより三次元仮想セル集合30を定義しているが、図20に示すように、水平方向に細長い三次元セルを用意し、このような三次元セルを一次元マトリックス状に配列することにより三次元仮想セル集合30を定義することも可

能である。図20に示す例では、水平方向に細長いセルC(1)、C(2)、C(3)、…を垂直方向に並べるにより、三次元仮想セル集合30が形成されている。このように一次元マトリックス状に配列したセルからなる光学素子に物体像10を記録した場合、垂直方向に関する立体視のみが可能な再生像しか得られないことになるが、用途によっては十分に利用価値がある。

【0084】本発明に係る光学素子は、何らかの物体像10をホログラムとして記録し、立体像としてこれを再生するという「ホログラム記録媒体」としての用途に利用できることは勿論である。しかしながら、本発明は、このようなホログラム記録媒体としての用途に限定されるわけではなく、光学フィルタ、偏光素子、光変調素子といった一般的な光学素子を製造する場合にも利用することができる。たとえば、物体像10として、単純な格子模様のパターンを用い、このパターンから発せられる物体光の複素振幅分布を物理的な媒体上に記録するにすれば、特有の光学的作用をもった光学素子を実現することができる。

【0085】また、三次元セルの配置は、必ずしも直交座標系に沿った配列にする必要はなく、たとえば、極座標系を利用して球面に沿った配列にすることも可能である。更に、上述した実施形態で用いた三次元物理セルは、いずれも受動素子としてのセルであったが、本発明に用いる物理セルは、外部からの信号に基づいて屈折率、透過率、反射率などを制御することが可能な能動的素子によって構成してもかまわない。たとえば、個々の物理セルを液晶などの複屈折性物質によって構成しておき、常光と異常光との割合を外部の信号によって制御できるようにしておけば、外部から与える信号に基づいて、個々の物理セルのもつ特定振幅および特定位相を決定することができるようになる。このような能動的素子を物理セルとして用いた光学素子では、記録された像は物理的に固定されているわけではないので、外部からの信号に応じて、任意の物体像を再生することができるようになる。

【0086】

【発明の効果】以上のとおり本発明によれば、物体像が干渉縞としてではなく物体光の複素振幅分布として記録されるため、再生時に高い回折効率が得られる。しかも、複素振幅分布は、三次元セルの光学的特性を利用して記録されるので、生産性に優れた光学素子を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】参照光を利用して、光学的に干渉縞として物体像を記録する一般的なホログラフイーの手法を示す斜視図である。

【図2】点光源Oと記録面20とが定義されている場合に、記録面20上の代表点P(x, y)に到達した物体光の振幅と位相を示す斜視図である。

【図3】物体像10上の各点光源から発せられる物体光が、記録面20上の代表点P(x, y)に到達した場合の代表点P(x, y)の位置における物体光の複素振幅を示す斜視図である。

【図4】複素座標平面上の座標点Qで示される複素振幅に基づいて、振幅A(x, y)と位相 θ (x, y)が求まることを示す図である。

【図5】物体像10を記録するために定義された三次元仮想セル集合30の一例を示す斜視図である。

【図6】本発明に用いる三次元セルC(x, y)の振幅変調および位相変調の機能を示す図である。

【図7】本発明に係る光学素子の構成要素となるべき、透過率および屈折率の異なる16通りの物理セルの一例を示す図である。

【図8】本発明に利用するのに最適と考えられる物理セルC(x, y)の構造の一例を示す斜視図である。

【図9】図8に示す物理セルC(x, y)を透過型セルとして用いる場合において、振幅の情報が溝G(x, y)の幅G1として記録され、位相の情報が溝G(x, y)の深さG2として記録される理由を説明する正面図である。

【図10】図8に示す物理セルC(x, y)を反射型セルとして用いる場合において、振幅の情報が溝G(x, y)の幅G1として記録され、位相の情報が溝G(x, y)の深さG2として記録される理由を説明する正面図である。

【図11】図8に示す物理セルC(x, y)の構造において、7通りの溝幅と、4通りの深さとを定め、合計28通りの物理セルを用意した例を示す斜視図である。

【図12】透過型セルC(x, y)について、各部の屈折率と溝の深さとの関係を示す図である。

【図13】反射型セルC(x, y)について、各部の屈折率と溝の深さとの関係を示す図である。

【図14】本発明に係る光学素子に対して法線方向から再生用照明光を当て、ホログラムとして記録されている物体像を法線方向から観察する基本的な形態を示す側面図である。

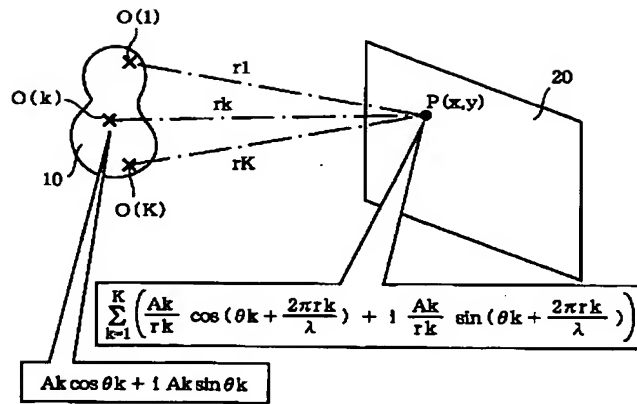
【図15】本発明に係る光学素子に対して斜め方向から再生用照明光を当て、ホログラムとして記録されている物体像を法線方向から観察する形態を示す側面図である。

【図16】本発明に係る光学素子に対して法線方向から再生用照明光を当て、ホログラムとして記録されている物体像を斜め方向から観察する形態を示す側面図である。

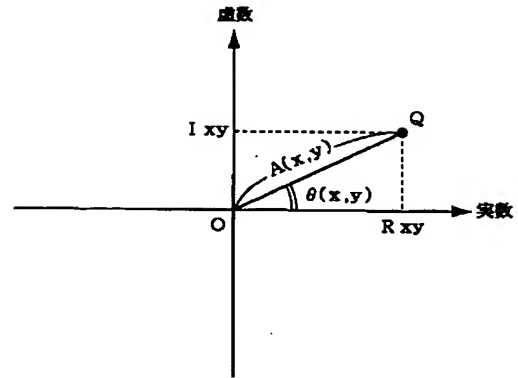
【図17】図15に示す再生環境に対応した光学素子を作成するために、特定位相の修正処理を行う原理を示す側面図である。

【図18】図16に示す再生環境に対応した光学素子を作成するために、特定位相の修正処理を行う原理を示す

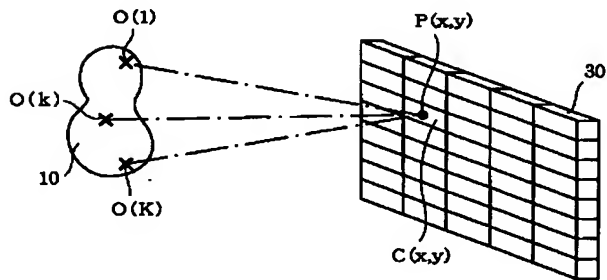
【図3】



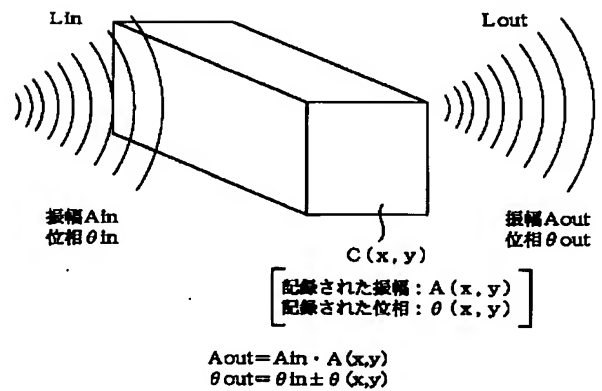
【図4】



【図5】



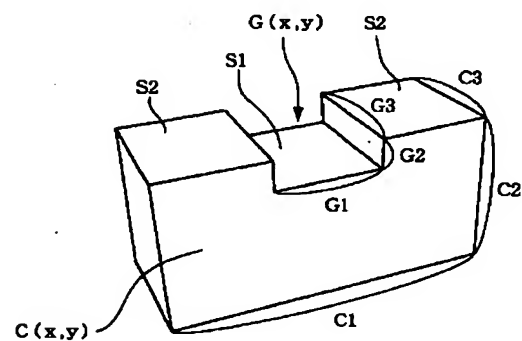
【図6】



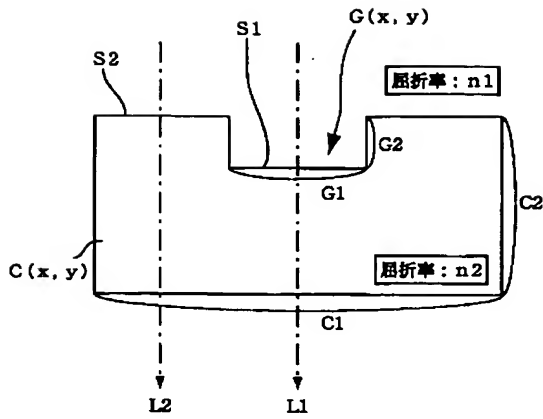
【図7】

| | | 振幅A | | | | |
|----------------|----------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | | $A(x,y)$ | 0~25% | 25~50% | 50~75% | 75~100% |
| 位相 θ | $\theta(x,y)$ | | 屈折率: n1 | 屈折率: n1 | 屈折率: n1 | 屈折率: n1 |
| | $0 \sim \frac{\pi}{2}$ | | | | | |
| | $\frac{\pi}{2} \sim \pi$ | | | | | |
| | $\pi \sim \frac{3}{2}\pi$ | | | | | |
| | $\frac{3}{2}\pi \sim 2\pi$ | | | | | |

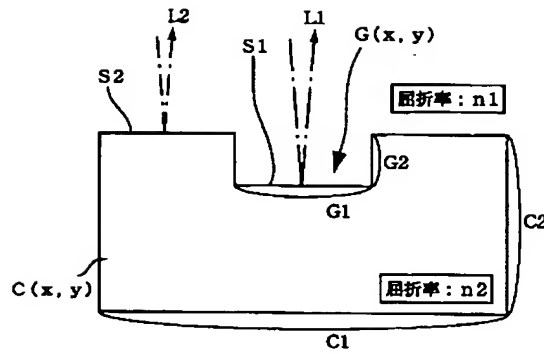
【図8】



【図9】

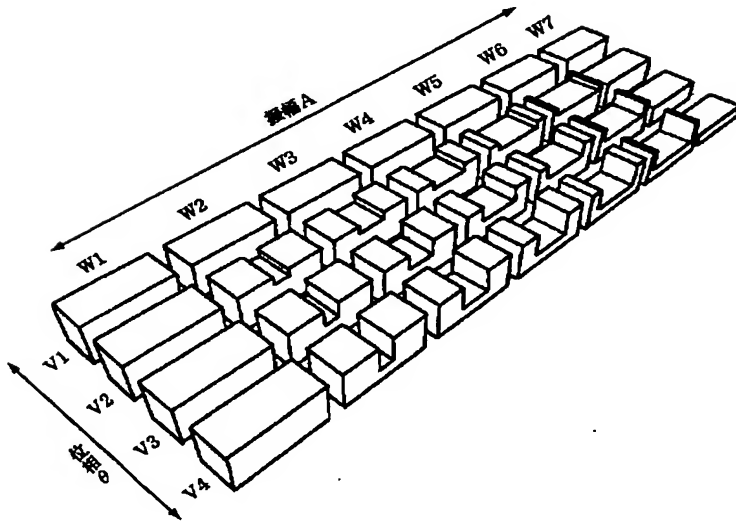


【図10】

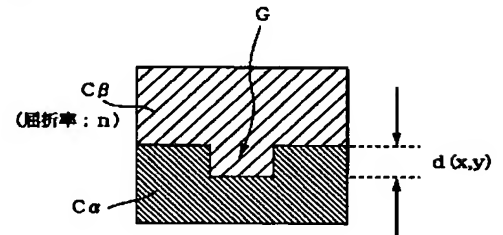


【図13】

【図11】



反射型セル: C(x,y)



○溝Gの最大深さ: $d_{\max} = \frac{\lambda}{2n}$

○特定のセルC(x,y)についての溝Gの深さ:

$$d(x,y) = \frac{\lambda \cdot \theta(x,y)}{4\pi n}$$

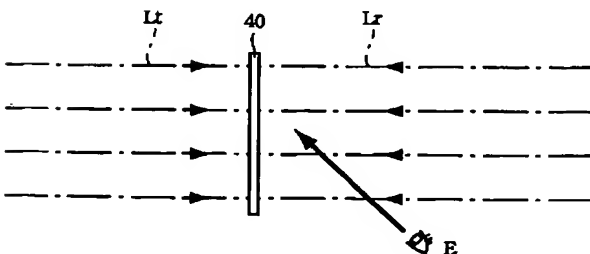
特に、保護層Cβを設けずに空気層とした場合は、 $n=1$ と近似することにより

○溝Gの最大深さ: $d_{\max} = \frac{\lambda}{2}$

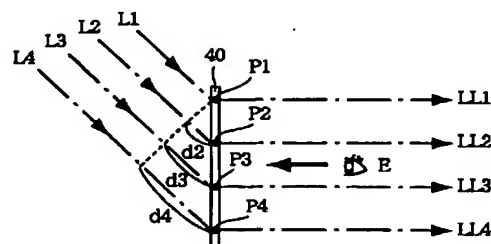
○特定のセルC(x,y)についての溝Gの深さ:

$$d(x,y) = \frac{\lambda \cdot \theta(x,y)}{4\pi}$$

【図16】

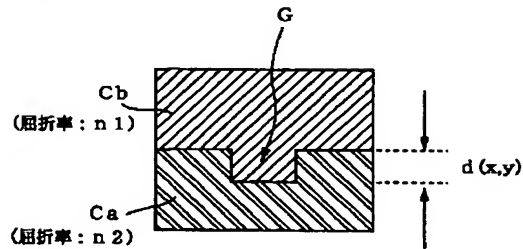


【図17】



【図12】

透過型セル：C(x,y)



○溝Gの最大深さ： $d_{\max} = \frac{\lambda}{|n_1 - n_2|}$

○特定のセルC(x,y)についての溝Gの深さ：

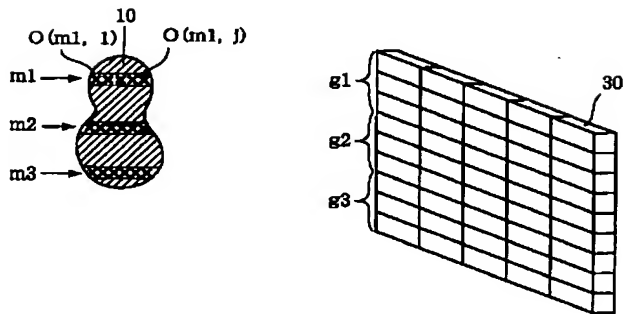
(1) $n_1 > n_2$ の場合

$$d(x,y) = \frac{\lambda \cdot \theta(x,y)}{2(n_1 - n_2)\pi}$$

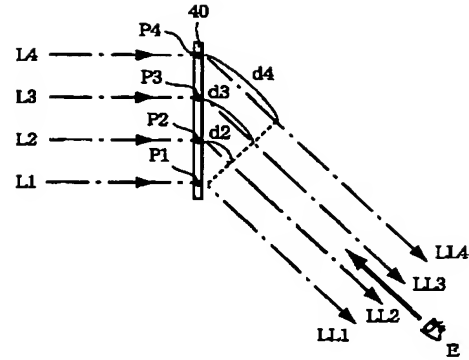
(2) $n_1 < n_2$ の場合

$$d(x,y) = d_{\max} - \frac{\lambda \cdot \theta(x,y)}{2(n_2 - n_1)\pi}$$

【図19】



【図18】



【図20】

